

表小段を持つ護岸による波の変形と越波量について

河野 二夫*・劉

非**・石場 良一**

1. 緒 言

単断面に比較して天端高さが低く、波の打上げ高や越波量を相当に低減できる海岸堤防（護岸）の形式として表小段を持つリーフ形状の複断面方式を提案し、この断面形状の護岸に対する波の変形やエネルギー逸散量、および越波量の低減に及ぼす小段長と入射波の波長の関係などについて実験的な研究を行なった。小段型式の複合断面構造の護岸の波の打上げに関しては Hunt の研究 (1961) があるが、彼によると berm (小段) は波の打上げ高を減少させ、小段上に鉛直護岸堤を設けると波のエネルギーを相当に逸散できることを示している。また、本間 (本間仁編, 1972) は小段長と入射波の波長の比率が波の打上げに関係することを示唆している。豊島 (1964) は表小段を持つ複断面型堤防の波の打上げに関する二次元水理模型実験の結果に基づいて表小段と消波工などを組み合わせた場合には所要天端高は単断面の場合の約 4 割に低減することが可能であると結論している。彼の研究内容は波高や波形勾配と波の打上げ高の関係を示しているので小段長の効果については明確でない。

本研究の目的は表小段を持つ複断面低天端の堤防形式による護岸の波の反射率、通過率、エネルギー逸散率の評価および小段上の波の変形と越波量が小段長や堤天端高等によってどのような特性を有するかを実験的に明らかにすることである。なお、表小段先端部の形状は景観面なども考慮して四分円形断面を提案し、鉛直断面形状の場合との水理学的問題の相違点を明らかにした。

2. 実験装置と内容

実験装置の概要を図-1 に示した。実験は長さ 15 m、幅 0.6 m、深さ 1.0 m の二次元造波水路で行なった。水路末端には長さ 2 m、高さ (s) が 0.35 m の小段を設置した。小段の法先是四分円形あるいは鉛直断面形状になっており、四分円形の場合は開口率 0%, 20%, 30%, 40% の横スリットが取り付けられている。小段の先端 (法先) から l の位置に天端水深 Z_0 の堤防 (護岸) を設置し、その背後で越波量 Q を計測した。越波量を計測しない場合で小段上の波形の変形を計測する場合は堤防の前面に消波工を設けた。入射波形や反射率および小段上の波形の変形を調べる目的で所定の場所に 7 本の容量式波高計を設置して計測した。図-1 の中で①は入射波の波高計で造波板より約 3 m の地点に置き、⑤⑥⑦は小段上の波高計を示す。以上の外に反射率を評価する目的で①～⑤の間に可動できる 3 本の波高計が設置してある。小段長 l は 0～1.0 m の範囲を 0.25 m 間隔で変化させた。小段面上の護岸の天端高は 6.5 cm、8.5 cm の 2 種類を用いた。

越波量は護岸背後に集水箱を設置し 3 波程度の越波による集水量を計量して 1 波当たりの平均越波量を求めた。入射波高 (H_i) は 2～12 cm、周期 (T) は 0.8～2.5 秒の範囲の実験を行なった。また実験内容は後述の通りである。表-1 に実験の主な諸元を示す。

3. 実験結果と考察

(1) 小段上の波の変形

図-2 には小段上の波の変形について法先が四分円形

表-1 Wave properties and model dimensions

Dimension of models				Characteristics of wave		
h (cm)	s/h	λ (%)	Z_0/h	T (sec)	H_i (cm)	H_i/L
25	0.875	0	0.088	0.8	2.0	0.01
30		20				
35	1.4	30	0.297	2.5	12.0	0.1
40		40				

注: λ (開口率) は四分円形断面の場合だけとし、 L (波長) は水深 (h) の水平部の計算値、 H_i は入射波高。

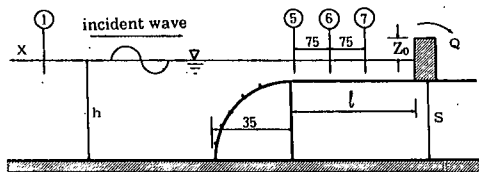


図-1 Definition sketch (unit: cm)

* 正会員 工博 宮崎大学教授 工学部土木工学科

** 学生会員 宮崎大学大学院 工学研究科

の場合の実験結果の1例を示した。pointの番号は図-1に示した波高計の番号を示し、縦軸には波形(η)を入射波高(H_i)で無次元化した値を示し、横軸には周期(T)で無次元化した時間を取ってある。図は $s/h=1$ の場合であるが、小段の先端部で打ち上げられた波はpoint⑤と⑥の間に急激に減少し段波状になって小段上を進行する。法先が鉛直形状の場合は段波の分裂したものが多く見られた。以上の現象は入射波や s/h の比率に大きく支配され一般には複雑な波形になるため統一的に整理できるまでには到らなかった。

(2) 反射率(K_r)

ステップ形状のreefによる波の反射率や通過率に関する研究は古くから多くなされている。不連続境界面での波の部分反射の問題を理論的に扱ったLambの研究(1932)を始めとして、浅海部から深海部に進行する波の変形についての研究(Ippen, 1966)などがある。著者らも何つかの研究成果を報告している(1980, 1981, 1985)。

本論文は図-1に示すような小段を有する複合断面で小段面が計画高潮位より若干高い場合を想定した場合の波の反射率を実験的に調べた。実験結果を図-3～図-5に示した。

図-3は小段法先の形状を鉛直堤にした場合と四分円

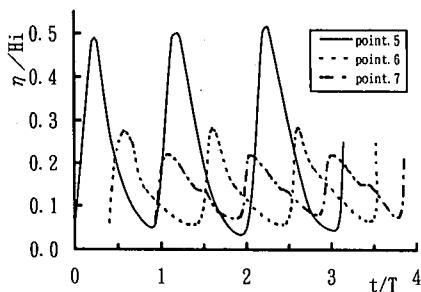


図-2 Transformations of wave profile over the berm ($\lambda=0\%$, $h=35$ cm, $s=35$ cm, $T=1.5$ sec)

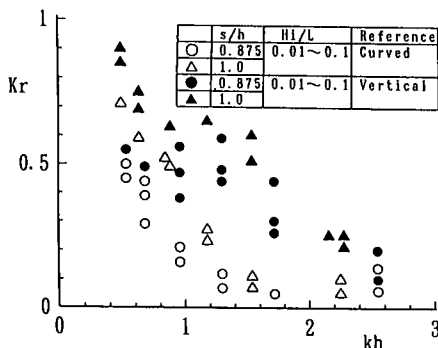


図-3 Relation between K_r and kh ($\lambda=0\%$)

形断面にした場合の比較が示してある。図によると曲面形の場合は鉛直堤に比較して反射率(K_r)は相当に低減している。また、入射波の波形勾配(H_i/L)による差異はいずれの形状の場合も大きな差異はないと判断される。小段面と法先水深の比(s/h)が小さい場合の反射率は大きい場合に比較して若干低減する。

図-4～図-5は小段法先が曲面形状の場合で曲面表面に設けた横スリットの開口率(λ)が反射率に及ぼす効果を実験的に調べたものである。実験結果の平均的な傾向としては(s/h)の値が増加すると反射率は増加する傾向にある。次に λ が増加する場合は全体的には反射率が若干増加する傾向が認められる。しかし、 s/h の値が1.16の場合で $\lambda=0\%$ と40%の場合は同程度の反射率になるが、20%や30%の場合は $\lambda=0\%$ の場合より低下した値になり、とくに20%の場合の反射率は最も小さい値になる。以上の結果に対する物理的理由は明確にできないが、開口部からの波の流入、流出の影響や小段面に遡上した波の戻り流れが反射率に影響していると思われる。

(3) 通過率(K_t)

通過率に関する実験結果を図-6～図-8に示した。この実験は小段上の堤防の前面に消波工を設置して行なった。図-6は小段法先が曲面形状の場合と鉛直断面の場合の比較が示してある。 s/h の値にかかわらず曲面形状の

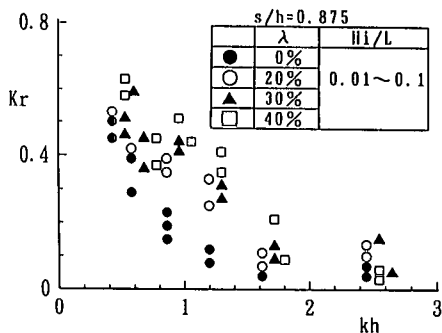


図-4 Relation between K_r and kh (Curved)

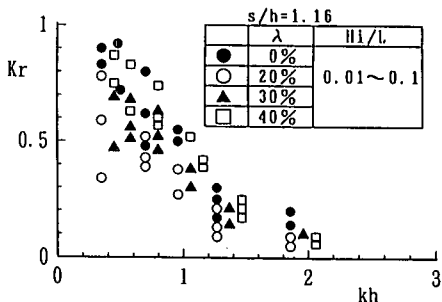


図-5 Relation between K_r and kh (Curved)

場合の通過率が若干大きい値になっている。

図-7～図-8は法先が曲面形状の場合の曲面表面に設けた横スリットの効果を調べたものである。 $s/h=0.875$ の場合は $\lambda=0\%$ の場合の通過率が最も大きい値になっているが、 $\lambda=20\%$ の場合や $\lambda=30\%$ の場合の通過率は相当に低減し、 $\lambda=40\%$ の場合は増加する傾向が見られる。 $s=h$ の場合は $\lambda=30\%$ の場合が最も低い値になるなど通過率は s/h の値に大きく支配される。これの物理的理由は明らかでないが、小段上の戻り流れと小段先端での波の相互作用に関係すると判断される。

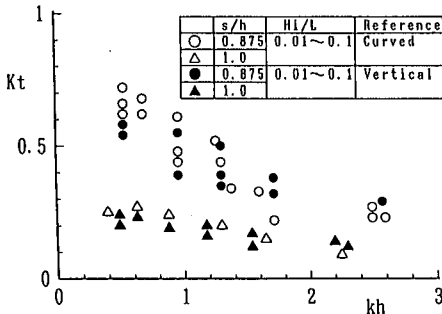


図-6 Relation between K_t and kh ($\lambda=0\%$)

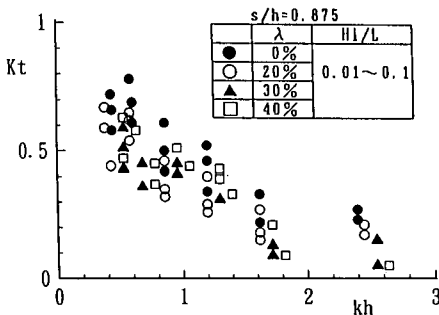


図-7 Relation between K_t and kh (Curved)

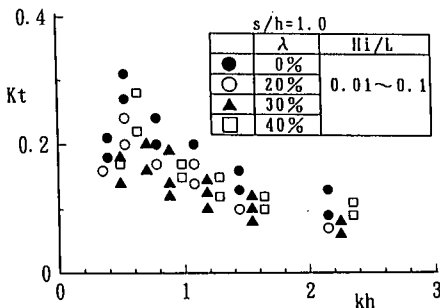


図-8 Relation between K_t and kh (Curved)

(4) エネルギー逸散率 (ϵ)

小段や法先の堤の形状による入射波のエネルギー逸散率を調べたものが図-9～図-12である。海底構造物によるエネルギー逸散に関して潜堤鉛直板の場合に wave maker 理論に基づく日野らの研究 (1971) があるが、彼らの手法に対し運動量保存則とエネルギー保存則を適用した Kono の研究 (1989) もある。本論文は小段を有する複合断面の護岸に対し、主に小段法先部分の形状や構造 (横スリット) による波のエネルギー逸散率 (ϵ) を式 (1) の定義に基づいて実験的に検討した。

$$\epsilon = \frac{T \cdot E_t}{T(\bar{E} \cdot Cg)_i} = 1 - K_r^2 - K_t^2 \cdot \left\{ \frac{(Cg)_t}{(Cg)_i} \right\} \dots (1)$$

ここに、 E_t は単位時間当りの波のエネルギー損失量、 $\bar{E}$: 入射波の全エネルギー密度、 $(Cg)_i$ と $(Cg)_t$ はおおの入射波および通過波の群速度、 K_r と K_t はおおの反射率と通過率を示している。 K_t の値は図-1で波高計⑦による測定結果によって算定した。この場合に小段上の堤の前面には消波工を設置した。

図-9は小段法先断面が鉛直堤の場合と四分円堤の場合の比較であるが、四分円堤の場合のエネルギー逸散量は鉛直堤の場合より大きい。理由は曲面の場合は反射率は小さく、通過率は若干大きい程度であるが小段先端部の戻り流れなどによるエネルギー損失量が意外に大きいと推測するものである。図-10～図-12は曲面形状の場合

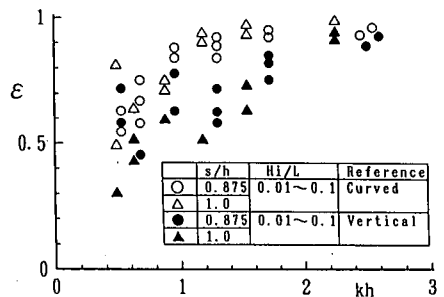


図-9 Relation between ϵ and kh ($\lambda=0\%$)

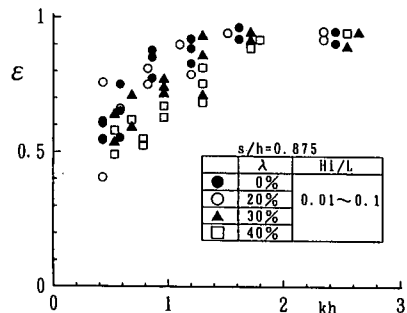
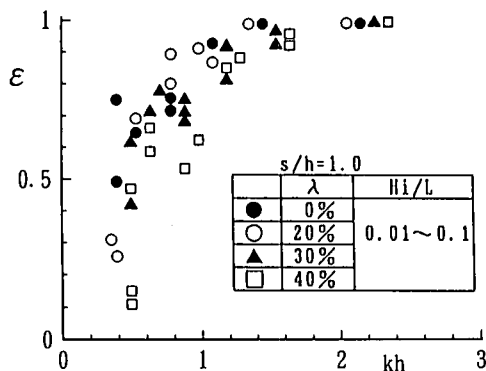
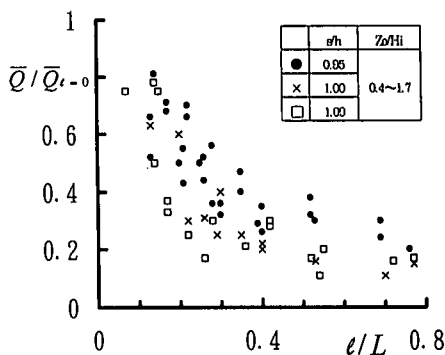
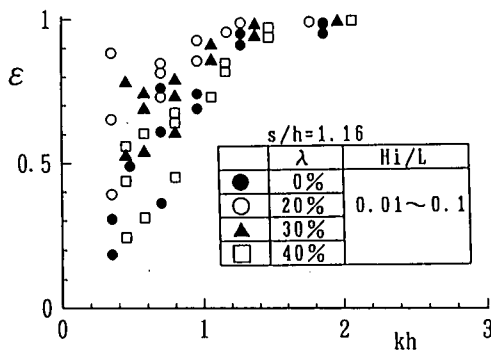
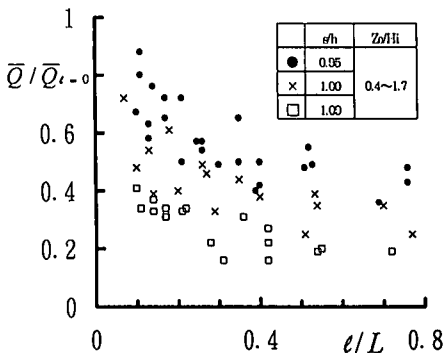


図-10 Relation between ϵ and kh (Curved)

図-11 Relation between ε and kh (Curved)図-13 Effect of l/L on $\bar{Q}/\bar{Q}_{l=0}$ (Vertical wall)図-12 Relation between ε and kh (Curved)図-14 Effect of l/L on $\bar{Q}/\bar{Q}_{l=0}$ (Curved wall, $\lambda = 0\%$)

で横スリットの開口率や s/h の比率が ε に及ぼす効果を調べたものである。明確ではないが、 $\lambda = 20\%$ の場合の ε の値は他の λ の場合に比較して大きく感じられる。また s/h の差異に対しては実験範囲の関係もあり、大差は認められない。

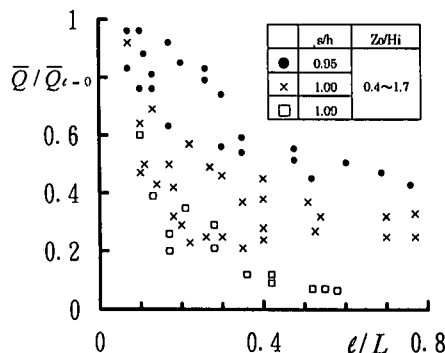
(5) 越波量と小段長の関係

越波量 (Q) の低減率に及ぼす小段長 (l) の効果についての実験結果を図-13~図-15に示した。 $\bar{Q}$ は1波当たりの越波量を無次元化したもので吉川・椎貝・河野の提案 (1968) した次式で算定した。

$$\bar{Q} = \frac{Q}{TBH_i \cdot \sqrt{2gH_i}} \quad \dots\dots\dots (2)$$

上式で T は周期、 B は水路幅、 g は重力の加速度である。実験結果を図-13~図-15に示した。

図-13は小段法先が鉛直堤の場合であり、図-14~15は四分円形断面の場合である。 $\bar{Q}$ の下つき suffix ($l=0$) は小段上の堤防 (護岸) を図-1に示した $l=0$ の点に固定した場合の $\bar{Q}$ の値である。図によると l と水深 h 点の波長の比率が増加すると越波量は指数関数的に減少する。その減少率は小段前面を鉛直堤にした場合が大きい。次に s/h が1より小さい場合に比較して1より大きくな

図-15 Effect of l/L on $\bar{Q}/\bar{Q}_{l=0}$ (Curved wall, $\lambda = 20\%$)

るほど小段長の効果大きいことは明らかである。鉛直堤と四分円形状 ($\lambda = 0\%$) の場合の比較では l/L の値に対する $\bar{Q}$ の低減率は s/h の値にかかわらず鉛直堤の場合が大きい。しかし、 $s/h = 1$ 以上の範囲では $l/L = 0.2 \sim 0.3$ 付近より両者の値はほとんど同程度になる。四分円形状の場合のスリットの開口率 (λ) による効果は実験結果のパラツキが大きいかいけれども平均的には $s/h < 1$ の場合は $\lambda = 0\%$ の方が低減率は大きく、その値も小さいが、 l/L が

増加するのに伴って同程度の値になる。 $s/h > 1$ の場合は $\lambda = 20\%$ の方が低減率が大きく、その値も若干小さい。

4. 結 論

以上の研究結果から表小段を有する海岸堤防（護岸）の波の変形や越波量について次のことが結論される。

(1) 小段の先端で打上げられた波は急激に減少し段波状になって小段上を進行する。小段先端が鉛直断面の場合は四分円形断面の場合に比較して段波が分裂する傾向が見られる。

(2) 波高反射率は波形勾配にはあまり関係なく相対水深の増加に伴って指数関数的に低減する。法先が鉛直断面の場合の反射率は四分円形断面の場合より大きい。小段法先が四分円形断面の場合で曲面上に設けた横スリットが反射率に及ぼす効果は開口率 20~30% の場合の反射率が 0% や 40% の場合より小さい。また、小段面の天端高さとなり水深の比が小さい程反射率は大きくなる。

(3) 通過率は小段面の天端高さとなり水深の比にかかわらず四分円形断面の場合が鉛直断面の場合より若干大きい。表法先が四分円形断面の場合は横スリット開口率が 20% や 30% の時に通過率は相当に低減する。

(4) 小段先端が四分円形断面の場合のエネルギー逸散率 (ϵ) の値は鉛直断面の場合に比較して相当に大きい。四分円形断面の場合で横スリット開口比がエネルギー逸散率に及ぼす効果は全体としては $\lambda = 20\%$ の場合が大きい、 $\lambda = 40\%$ の場合は小さいと判断される。また s/h の変化に対しては $s/h = 1$ の場合が小さく、 $s/h < 1$ の場合は大きいが大差は認められない。

(5) 越波量の低減に及ぼす小段長の効果は小段法先部分でかなりの低減があり、 l/L の増加に伴って指数関

数的に低減する。この効果は四分円形断面の場合より鉛直断面の場合のが大きい。四分円形断面の場合の横スリット開口率の効果は $s/h < 1$ の場合は $\lambda = 0\%$ の場合が効果が大きく、 $s/h > 1$ の場合は $\lambda = 20\%$ の場合の効果が大きい。しかし、これらの値も平均的には l/L の値が増加すると大差はなくなる。

本研究を進めるにあたり、模型製作や実験に協力していただいた本学技官・高野重利氏に感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 河野二夫・津嘉山正光 (1981): リーフによる波の変形に関する研究, 土木学会論文報告集, 第 307 号, pp. 27-38.
- 河野二夫・松山浩昭・高野重利 (1985): ステップ形状による波の反射率と通過率に関する研究, 第 32 回海岸工学講演会論文集, pp. 80-84.
- 豊島 修 (1964): 表小段を持つ複断面型堤防への波の打上げ高について, 第 11 回海岸工学講演会論文集, pp. 266-272.
- 日野幹雄・山崎丈夫 (1971): 垂直板による波の反射率およびエネルギー損失, 土木学会論文報告集, 第 190 号, pp. 75-80.
- 本間 仁編 (1972): 海岸防災, 共立出版 KK, pp. 208-211.
- Hunt, I. A. (1961): Design of sea-walls and breakwaters, Trans. ASCE, Vol. 126, paper No. 3214, pp. 542-570.
- Ippen, A. T. (Editor, 1966): Estuary and Coastline Hydrodynamics, McGraw-Hill Book Company Inc., New York, pp. 72-75.
- Kono, T. and Tsukayama, S. (1980): Wave transformation on reef and some consideration on its application to field, Coastal Eng. Japan, Vol. 23, pp. 45-57.
- Kono, T. (1989): Wave damping effects of a submerged vertical thin barrier, Coastal Eng. Japan, Vol. 32, No. 2, pp. 235-255.
- Kikkawa, H., Shi-igai, H. and T. Kono, (1968): Fundamental study of wave overtopping on levees, Coastal Eng. Japan, Vol. 11, pp. 107-114.
- Lamb, H. (1932): Hydrodynamics, 6th Edition, Cambridge Univ. Press, pp. 262-263.